
PROGRAMACIÓN DE GRÚAS PARA MANTENCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE BUQUES EN UN ASTILLERO NAVAL. USO DE MODELO MATEMÁTICO.

MARCELO GUÍÑEZ ^{*}
LORENA PRADENAS R ^{**}
ELISEO MELGAREJO ^{**}

Resumen

En el presente estudio se desarrolla una propuesta de solución para el problema de asignación de grúas a proyectos o buques para la: reparación, mantención, modernización, apoyo y construcción, en un astillero naval. Se establecen los antecedentes generales del tema, y las justificaciones de éste, determinando la necesidad de proponer un modelo matemático diseñado para el problema particular, detallando y explicando todas las variables, parámetros y restricciones que presenta la solución, teniendo una alternativa al actual sistema que depende de la experiencia del programador. Además se proporciona la solución implementada en el programa ILOG CPLEX utilizando Microsoft Office Excel como plataforma de datos, obteniendo resultados para un caso particular de instancias.

PALABRAS CLAVE: Programación de Grúas, Astillero, PLEM, Aplicación a Problemas Reales.

*DII- Universidad de Concepción, Chile y ASMAR-Talcahuano-Chile

**DII- Universidad de Concepción, Chile

1. Introducción

Un astillero naval es una empresa que fabrica y repara buques comerciales y navales. Dentro de las operaciones de este tipo de empresa, la programación y distribución de grúas es una de las actividades relevantes. Cada requerimiento de grúas se realiza a través de una plataforma informática solicitando la información de entrada con 24 horas de anticipación. El jefe de turno realiza la programación de forma manual. Además de los pedidos de producción, existen requerimientos de especial prioridad los cuales deben ser también satisfechos. Algunos de los inconvenientes que se observan en la programación de grúas son:

- Programación basada en la experiencia del Jefe Turno, que no siempre es la más adecuada.
- Programación por prioridad del solicitante con mayor insistencia o mayor jerarquía.
- Asignación de grúas sin considerar el mayor beneficio de ingresos para el Astillero.
- Política de subcontratación de grúas faltantes tiene deficiencias en el orden de generar mayor ingresos al Astillero.

En el astillero se disponen de varios tipos de grúas y entre otras son: Grúas portales, grúas flotantes y grúas rodantes. En particular la grúa flotante corresponde a una embarcación con dotación propia. En caso necesario se debe subcontratar a terceros grúas lo que aumenta los costos de operaciones. Prácticamente todos los procesos de la empresa requieren obligatoriamente el uso de grúas. Algunos de estos procesos son:

- Transporte, en tareas de reparación, instalación, ubicación y movimientos de equipos de apoyo a la producción.
- Cambio de equipos de las naves (motores, compresores, ventiladores, turbinas, etc.)
- Mantenimiento e inspección de sistemas y equipos.
- Procesos de limpieza y en órdenes de: Retiro de escombros, arena, gránula, maderas, recubrimientos, estructuras, desechos industriales, etc.

Por todo lo anterior, las grúas son un apoyo logístico fundamental para el proceso productivo en un astillero. En una programación ineficiente de éstas, se traduce en:

- Atraso de proyectos.
- Pérdida de recursos por paralización de obras, por ejemplo para eventualidades que signifiquen bloqueos de algunos intervalos de tiempo.
- Dilatar los procesos productivos.
- Reclamos e insatisfacción de los clientes.

A continuación se realiza un breve análisis de la literatura especializada y que proporciona algunas herramientas matemáticas y algorítmicas para resolver problemas de este tipo. En particular el problema de programación de grúas en terminales portuarios ha sido un tema tratado por los investigadores, los cuales se empeñan en hacer un mejor uso de las grúas para así mejorar el funcionamiento del puerto acelerando el flujo de naves que atracan en él, siendo ésta una de las medidas de desempeño más importantes para medir la calidad del Terminal portuario.

Al igual que en los puertos, los astilleros también disponen de un número limitado de grúas las cuales deben realizar una serie de trabajos contra el tiempo. En [1], se examina la programación de la grúa para los puertos, se inicia con un caso determinístico simple y lo utilizan como un elemento básico para desarrollar una comprensión del problema dinámico. En [5], se estudia la programación de grúas en puertos con restricciones espaciales y de separación. La grúas no se pueden cruzar y existe una distancia mínima entre ellas y los trabajos no pueden ser realizados simultáneamente. El objetivo es encontrar un apareamiento máximo entre grúa y trabajo, usan programación dinámica, una heurística tabú y una búsqueda local. El trabajo de [3], se programan grúas de muelles, que son obviamente los equipos más importantes en un terminal portuario, proponen un modelo de Programación Lineal Entera Mixta (MIPL, del inglés *Mixed Integer Linear Programming*), considerando restricciones relativas a la operación y proponiendo una solución basada en *branch and bound* y una heurística GRASP para situaciones donde *branch and bound* no puede operar. [7], propone programar múltiples grúas de patios que realizan diversos trabajos con diferentes tiempos de término en una zona con un solo carril de viaje bidimensional, se trabajó con un modelo MILP y una heurística dinámica entregando buenos resultados para cotas inferiores.

En el estudio de [4], se desarrollan modelos para programar grúas de yarda (enrielladas). En [9] muestran una heurística de búsqueda tabú para el problema de programación cuadrática y grúas en un muelle, el problema consiste

en un número fijo de grúas de muelle para carga y descarga de contenedores hacia y desde un buque. En [2], se propone un modelo que busca disminuir la tardanza de los trabajos, así como también disminuir el número de trabajos atrasados y corresponde a la fuente principal del presente estudio. Para esto usan MIPL, acompañado de la programación por restricciones. Esta propuesta híbrida resulta ser mucho más rápida en su resolución que los modelos que adoptan solo una de las herramientas por sí misma.

A su vez en [10], también presentan un problema de programación de trabajos que deben ser ejecutados y posteriormente un problema de asignación de grúas a estos trabajos también en un astillero, utilizando instancias generadas arbitrariamente.

Finalmente [6], analiza el problema de la programación grúas de muelle que se utilizan en las terminales portuarias de contenedores por mar para cargar y descargar contenedores. Se presenta un modelo de y también se propone un procedimiento heurístico de solución.

En general la mayoría de los trabajos relacionados con el tema, están formulados como Job Shop considerando, un ambiente donde hay trabajos que con diferentes operaciones y siguen distintas rutas por las máquinas o centros de trabajo. Al contrario del problema que enfrentamos nosotros, el cual se asemeja más a un ambiente de máquinas paralelas. Aquí una tarea puede ser ejecutada por cualquiera de las máquinas (grúas) que se encuentran en el astillero, con un tiempo de proceso que no será modificado por elegir una grúa u otra. El caso en estudio se desarrolla bajo este ambiente.

Basado en el problema a tratar y la revisión bibliográfica realizada en éste estudio se plantea un diseño e implementación computacional de un MIPL que permita apoyar y mejorar la programación de grúas en un astillero naval.

2. Modelo matemático propuesto

Se propone un modelo matemático que busca minimizar la tardanza sujeta a la disponibilidad horaria de las grúas y al tiempo de utilización de las mismas. Por otro lado, se presenta un criterio de priorización en donde las solicitudes son consideradas según un criterio predefinido, para ello existe un factor de prioridad (ver Tabla 1), considerando así un modelo matemático con una función objetivo que consta de minimización de las tardanzas ponderada.

Sean los siguientes conjuntos:

$J = 1, \dots, n$, conjunto de solicitudes o trabajos o tareas a programar.

$I = 1, \dots, m$, conjunto de grúas disponibles.

$I_s = 1, \dots, s$, con $I_s \subseteq I$; conjunto de grúas subcontratadas disponibles.

$T' = 1, \dots, T$, conjunto de periodos disponibles, donde $t = 1$ es el instante 00:00 horas, $t = 2$ es el instante 01:00 horas, $t = 24$ es el instante 23:00 horas.

$B' = 1, \dots, B$, conjunto de periodos bloqueados.

Sean las siguientes variables de decisión:

L_j : Indica si la tarea $j \in J$, está o no atrasada, tiene valor 1, si a tarea $j \in J$ está atrasada o valor 0 en caso contrario.

x_{ijt} : Identifica si se asigna la grúa $i \in I$ a la tarea o solicitud $j \in J$, en el periodo $t \in T'$, tiene valor 1, si es la grúa $i \in I$ es asignada a la solicitud $j \in J$, en el periodo $t \in T'$ o valor 0, en caso contrario.

Considerando los siguientes parámetros:

p_j : Tiempo de proceso de solicitud $j \in J$, en horas.

d_j : Hora máxima de entrega de solicitud $j \in J$.

O_i : Capacidad en toneladas de la grúa $i \in I$.

R_j : Requerimiento de capacidad en toneladas de la solicitud $j \in J$.

D_{ij} : Tiene valor 1, si la grúa $i \in I$ puede atender la solicitud $i \in J$ o valor 0, en otro caso.

b_k : Periodo $k \in B'$ bloqueado.

W_j : Prioridad o peso de la solicitud $j \in J$. Donde pesos menores indican mayor importancia de la tarea. Los valores de

W_j van desde 1 a 10 según la Tabla 1:

Tipo de solicitud	Peso
Urgente	1
Solicitud estratégica	2
DS N°2	3
DS N°1	4
Proyectos prioritarios	5
Proyectos construcción 1	6
Proyectos construcción 2	7
Proyectos pesqueros 1	8
Proyectos pesqueros 2	9
Otros proyectos	10

Tabla 1: Prioridades de las Solicitudes

A continuación se presenta el modelo matemático propuesto:

$$\text{mín} \sum_{j \in J} L_j W_j \quad (1)$$

$$\sum_{i \in I} (t + p_j) x_{ijt} - d_j \geq T L_j; \quad \forall j \in J, e \in T' \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{t \in T'} x_{ijt} = 1 \quad \forall j \in J \quad (3)$$

$$\sum_{j \in J} R_j x_{ijt} \leq O_i; \quad \forall i \in I, t \in T' \quad (4)$$

$$x_{ijt} \leq D_{ij}; \forall i \in I, j \in J, e \in T' \quad (5)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{t \in S} x_{ijt} \leq 1; \quad \forall j \in J, t \in T' \quad (6)$$

$$\text{con } S = \{t' / ma(t - p_j, 0) < t' < t\}$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{t \in T'} x_{ijt} p_j \geq 8; \quad \forall i \in I_s \quad (7)$$

$$x_{ijt} = 0 \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T' \mid t > T - p_j \quad (8)$$

$$x_{ijt} = 0 \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T' \mid t > b_k - p_j, \forall k \in B' \quad (9)$$

2.1. Descripción de la Formulación Matemática

La expresión (1), corresponde a la función objetivo, la cual pretende minimizar el número total de tareas atrasadas, ponderadas de acuerdo a su clasificación de importancia.

La expresión (2), establece que una tarea es considerada atrasada si no cumple con su hora tope de entrega.

La expresión (3), establece que todas las tareas deben ser asignadas a los periodos disponibles, aun cuando estas estén atrasadas.

La expresión (4), establece que la capacidad en tonelajes de la solicitud no debe sobrepasar la capacidad de las grúas.

La expresión (5), hace referencia a la posibilidad de asignar una grúa a un trabajo sólo si ésta asignación es considerada como factible por el jefe de turno.

La expresión (6), establece que una grúa no puede ser ocupada por otra solicitud mientras está en proceso (restricción de continuidad).

La expresión (7), establece que cada tarea subcontratada debe tener un mínimo de 8 horas de uso.

La expresión (8), limita las asignaciones fuera de la jornada.

La expresión (9), corresponde a un conjunto de restricciones complementarias, cuando se desea restringir ciertos intervalos de tiempo, como por ejemplo descansos y/o periodos de colación.

3. Resultados

Se diseñaron instancias del problema las cuales pretenden mostrar las diferentes cualidades que presenta el modelo, considerando que la instancia número 2 corresponde a un caso de similar tamaño a lo cotidiano en la empresa, mientras que las demás instancias fueron elegidas arbitrariamente considerando diferentes eventualidades. La implementación se realiza en el software IBM ILOG CPLEX 12.1 en una CPU AMD Athlon II Dual Core M320 (2.1 GHz) con 1.75 GB en RAM, utilizando las condiciones *default* del algoritmo.

Descripción instancias utilizadas:

Instancias N°1: 3 grúas, 5 tareas y 24 períodos.

En la Tablas 2.a y 2.b se presentan los datos para la instancia N°1, se tienen 3 grúas y una es subcontratada. Debido a restricciones físicas la solicitud número 3 (tarea), sólo puede ser ejecutada por la grúa subcontratada,

Grúas	1	2	3
O _i	20	60	40

(a) Capacidades de las grúas para la instancia 1

Tareas o solicitudes	1	2	3	4	5
R _j	10	30	40	50	60
d _j	5	5	10	8	8
P _j	2	5	5	6	6
W _j	4	4	2	9	4

(b) Características de las solicitudes o tareas para la instancia 1

Tabla 2: Instancias N°1

mientras que el resto de las tareas pueden ser ejecutadas por cualquier grúa.

Instancia N°2: 23 grúas, 50 tareas y 24 períodos.

Grúas	15, 15, 13, 28 , 50, 50, 4, 4
O _i	6, 6, 6, 6, 20, 20, 30, 30 30, 30, 40, 13, 50, 90, 200

(a) Capacidades de las Grúas para la Instancia 2

Tareas o solicitudes	
R _j	20, 25, 30,10, 5, 5, 5, 2, 40, 30, 90, 150, 2, 3, 30, 10, 15, 25, 8, 6, 6, 4, 4, 2, 2, 50, 50, 40, 5, 5, 1, 1, 1, 80, 190, 4, 4, 20, 30, 25, 3, 3, 30, 3
d _j	5, 24, 4, 6, 7, 9, 22, 12, 14, 14, 13, 15, 16, 20, 13, 20, 8, 15, 8, 21, 11, 17, 15, 16, 17, 10, 4, 18, 6, 4, 24, 19, 12, 9, 15, 24, 14, 12, 18, 10, 23, 24, 10, 6, 13, 15, 9 ,22, 6, 22
P _j	5, 15, 3, 3, 4, 2, 8, 8, 6, 11, 7, 9, 6, 12, 13, 10, 8, 4, 7, 18, 10, 12, 12, 14, 11, 9, 3, 9, 3, 2, 12, 12, 5, 6, 11, 15, 9, 4, 8, 8, 8, 5, 2, 4, 6, 6, 4, 9, 5, 7
W _j	9, 7, 8, 10, 10, 7, 1, 2, 7, 5, 6, 7, 7, 1, 1, 9, 2, 1, 2, 10, 1, 2, 3, 2, 7, 4, 1, 4, 8, 8, 2, 1, 2, 9, 4, 10, 10, 9, 4, 5, 5, 2, 4, 8, 7, 8, 7, 3, 1, 6

(b) Características de las solicitudes o tareas para la instancia 2

Tabla 3: Instancia N°2

En las Tablas 3.a y 3.b se presentan los datos para la instancia N°2. Las grúas número 21, 22 y 23 son subcontratadas y en este caso cualquier grúa puede atender cualquier solicitud.

Instancia N 3: 23 grúas, 50 tareas y 35 períodos.

Se utilizan los mismos datos de entrada que la instancia 2. Adicionalmente, basado en un caso real, debido a una ceremonia de inauguración, las actividades se detienen en el intervalo entre 13:00 - 14:00 (conjunto de restricciones número 9). Se aumentó el número de periodos a asignar a 35 (valor arbitrario) con el objetivo de generar una solución factible (cada proyecto debe comenzar, al menos dentro del periodo).

Los resultados del modelo aplicado a las instancias de prueba se observan en la Tabla 4 y en todos los casos se obtiene la solución óptima.

Instancia	Función objetivo	Trabajos Atrasados	Tiempo CPU (s)
1	4	1	0,06
2	5	2	3.10
3	35	7	3.57

Tabla 4: Resumen de resultados para instancias de prueba

4. Conclusiones

Las instancias revisadas comprueban en la práctica la eficacia en tiempo de resolución del modelo presentado, al menos para el tamaño actual de las faenas, lo que facilitaría una gran tarea (manual), que toma horas en realizar, en una tarea de segundos, sin contar la notable diferencia en la calidad alcanzada. El modelo en la práctica no se ha llevado a cabo pero si se considera realizar gestión es para poder materializarlo.

Finalmente se considera el énfasis en cumplir con la cabalidad de las restricciones prácticas impuestas por el astillero naval, sin embargo se esperaría a futuro considerar los siguientes puntos: tiempos de setup dependientes del servicio o tarea y generar una heurística correctiva posterior a la asignación, que permita reutilizar los horarios de forma que se cumplan lo más tempranamente posible, entre otros.

Agradecimientos: Este estudio tiene apoyo parcial de los proyectos: UDEC N°208.97011-1 y BASALCONICYT-FB0816.

Referencias

- [1] Daganzo C.F., The crane scheduling problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 23 (2), 159-175. 1989.
- [2] Hooker J. N., An Integrated Method for Planning and Scheduling to Minimize Tardiness. *Constraints*, 11 (2-3), 139-157. 2006.
- [3] Kim K. H., Park Y., A crane scheduling method for port container terminals. *European Journal of Operational Research*, 156, 752-768. 2004.
- [4] Kang J., Oh M., Ahn E., Ryu K., y Kim K., 2006. Planning for Intra-block Remarshalling in a Container Terminal. *Advances in Applied Artificial Intelligence*, 1211-1220. 2006.
- [5] Lim A., Rodriguez B., Xiao F., y Ihue X., Crane scheduling with spatial constraints. *Naval Research Logistics*, 51, 386-406. 2004.
- [6] Meisel F. y Bierwirth C., A unified approach for the evaluation of quay crane scheduling models and algorithms, *Computers & Operations Research*, vol. 38, n°. 3, 683-693. 2011.
- [7] Ng W. C. 2005. Crane scheduling in container yards with inter-crane interference. *European Journal of Operational Research*, 164, 64-78.
- [8] Pinedo M.L., 2008. *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems*. Springer, Third edition.
- [9] Sammarra M., Cordeau J., Laporte G. y Monaco M., A tabu search heuristic for the quay crane scheduling problem. *Journal of Scheduling*, 10(4-5), 327-336. 2007.
- [10] Wen C., Eksioglu S. D., Greenwood A., y Zhang S., Crane scheduling in a shipbuilding environment. *International Journal of Production Economics*, 124 (1), 40-50. 2010